

## MEJORAS EN LA GESTIÓN DEL AGUA CON TÉCNICAS DE MODELADO Y CONTROL

G. Cembrano<sup>o</sup>, J. Quevedo\*, V. Puig\*, J.Figueras\*, R. Pérez\*

*<sup>o</sup>Instituto de Robótica e Informàtica Industrial (UPC-CSIC)  
Llorens i Artigas 4-6, Planta 2 - 08028 Barcelona  
gcmbrano@iri.upc.es*

*\*Dept. Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial  
Universitat Politècnica de Catalunya - Campus de Terrassa  
Rambla Sant Nebridi, 10 - 08222 Terrassa*

.....

### 1. INTRODUCCIÓN

La gestión del agua en las ciudades es un tema de gran impacto social y medioambiental. Más concretamente, los sistemas de gestión del agua puede considerarse formados por:

- Captación del agua desde fuentes superficiales o subterráneas, como ríos, embalses, acuíferos, etc.
- Producción o tratamiento de las aguas para alcanzar los niveles necesarios de calidad, en plantas potabilizadoras, desalinizadoras, etc.
- Transporte, que utiliza canalizaciones naturales e infraestructura hidráulica en lámina libre o a presión, para llevar al agua desde las plantas potabilizadoras a las zonas de consumo
- Distribución del agua a los consumidores a través de redes de tuberías a presión, que incluyen depósitos de almacenamiento de agua y dispositivos de control de caudal y presión, como estaciones de bombeo y válvulas
- Recolección de aguas residuales y pluviales, generalmente de forma conjunta, a través de redes de colectores, con el objeto de evacuarlas hacia plantas depuradoras y, finalmente, hacia algún medio natural (mar, río, etc.)

El creciente uso de las tecnologías avanzadas de la información y las comunicaciones para gestionar esos sistemas contribuye, en gran medida, a poder alcanzar objetivos de tipo medioambiental, económico y social. Véase, por ejemplo el informe "Hydroinformatics and urban drainage: an agenda for the 21st. Century" (Price,2000). En muchas ciudades, las redes de agua potable disponen de sistemas de telemetría y telecontrol, que permiten, por una parte conocer, en tiempo real, medidas de presión, caudal, calidad, volumen en los depósitos, etc., en diversos puntos de la red y, por otra, gobernar a distancia los elementos fundamentales de control de caudal y presión, tales como válvulas y bombeos.

En algunos casos, menos frecuentes, también el alcantarillado cuenta con sistemas de telemetría, que contienen una red de sensores (pluviómetros, que miden la intensidad de lluvia y limnómetros, que miden el nivel de llenado de los colectores) que envían periódicamente información a un centro de control. En algunas ciudades donde el crecimiento urbano, la orografía y la climatología, unidas a un sistema de drenaje urbano de capacidad limitada, pueden provocar graves problemas de inundaciones, se ha recurrido recientemente al uso de depósitos de retención de aguas pluviales y compuertas de desviación de caudal. Estos se gestionan a través de un sistema de telecontrol.

## 2. PROBLEMAS DE LA GESTIÓN DEL AGUA

Algunos problemas importantes de la gestión del agua en las ciudades son:

- el uso sostenible de los recursos hídricos limitados
- la capacidad de abastecimiento a los consumidores con los niveles de calidad y presión adecuados
- la minimización de pérdidas y fugas entre la captación y el consumidor final
- la minimización de inundaciones y vertidos contaminantes al medio natural provocados por la recolección conjunta de aguas residuales y pluviales

La gestión de los sistemas del agua potable y el alcantarillado debe hacerse con carácter predictivo, es decir, las acciones de control deben calcularse a futuro, en base a la información disponible actualmente en el sistema de telecontrol, con un horizonte apropiado. En el caso de los sistemas de abastecimiento y distribución de agua potable en las ciudades, el horizonte suele ser del orden de 24 horas y las consignas se calculan por intervalos del orden de una hora. En el caso de los sistemas de control en tiempo real del alcantarillado, según los casos, los horizontes de gestión dependen del tiempo medio de transporte del agua desde las zonas más altas de las ciudades hasta las plantas de tratamiento y el medio natural, que puede ser del orden de 30 minutos, con consignas para cada 5 minutos.

## 3. CONTRIBUCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE MODELADO Y CONTROL

El uso de sistemas de telemetría y telecontrol en los sistemas que forman el ciclo integral del agua es cada vez más amplio. El modelado y el control avanzado contribuyen eficazmente a mejorar las prestaciones de dichos sistemas, ya que permiten calcular, en base a los datos medidos por la telemetría y en tiempo real:

- los valores instantáneos de otras variables no medidas de la red y hacer una estimación del estado de la red
- predicciones de valores futuros
- efectos de las acciones de control sobre la red, sin necesidad de aplicar las acciones en el sistema físico
- estrategias de control a aplicar, para conseguir uno o más objetivos de explotación

### 3.1 Modelado

El modelado matemático de los sistemas hidráulicos involucrados en el ciclo del agua permite evaluar el efecto de las acciones de control y las perturbaciones sobre el funcionamiento de los mismos. El cálculo de estrategias óptimas de control requiere la evaluación de un elevado número de alternativas de control, a través de sus efectos en numerosas variables, tales como, caudales, presiones, niveles de depósitos, etc. Por esta razón, es necesario disponer de modelos matemáticos que sean, a la vez, representativos de la dinámica real y simples, de modo que puedan utilizarse para el cálculo de estrategias en tiempo real. En el caso de una red de agua potable, por ejemplo, puede ser necesario utilizar el modelo para evaluar el efecto de varios miles de alternativas de control antes de hallar una estrategia óptima y este proceso se realiza a cada intervalo de control.

Para las redes de agua potable, es necesario disponer de modelos de evaluación rápida para redes con grandes conducciones en lámina libre, por ejemplo en las zonas de captación, producción y transporte. También deben utilizarse modelos matemáticos para redes malladas a presión, e incluso combinaciones de conducciones a presión y en lámina libre. Igualmente, se

requiere modelar los almacenamientos y los elementos de control como válvulas y bombas. En el caso del alcantarillado, se modelan las redes de colectores (que son, en general, canalizaciones en lámina libre), entradas de lluvia a la red, escorrentías, almacenamientos, efectos de rebosaderos y de elementos de control como compuertas.

Por otra parte, la dinámica de los sistemas del ciclo del agua tiene componentes aleatorias. En el caso del agua potable, son fundamentalmente las demandas de los usuarios y, en el caso del alcantarillado, la intensidad e la lluvia que entra a la red. Por tanto, para el cálculo predictivo de estrategias, también son necesarios modelos de predicción de las componentes aleatorias

### **3.1 Control predictivo y óptimo**

Las técnicas de control predictivo y óptimo permiten calcular estrategias de control para alcanzar uno o más objetivos, a través del planteamiento matemático de un problema de optimización. Para cada instante de control, este problema expresa la búsqueda de consignas óptimas para el próximo horizonte de optimización. Por ejemplo, en un caso típico de gestión del agua potable, puede ser para las próximas 24 horas, con intervalos de 1 hora.

La función objetivo del problema de optimización es una expresión matemática de los objetivos reales de explotación de los sistemas hidráulicos, que pueden ser económicos, medioambientales, de calidad de servicio, de regulación de presiones, etc. Existe además, un conjunto de restricciones que tienen en cuenta la dinámica del sistema y las limitaciones físicas y/o operativas de los elementos que lo forman. La forma en que se plantea este problema de optimización y el número de variables e intervalos de control considerados condicionan fuertemente el tiempo necesario para su resolución. El proceso de optimización es una búsqueda en el espacio de soluciones admisibles, es decir, que cumplan todas las restricciones, para hallar la solución que produzca el mínimo valor posible para la función de coste.

En cada intervalo de control, se calcula una estrategia óptima para todo el horizonte, por ejemplo, en una gestión de agua potable, a cada hora, se calcularía una estrategia para las 24 horas siguientes. A continuación, se aplica la consigna del primer intervalo calculado y, se repite este proceso en los siguientes intervalos de control. Este método de control predictivo es conocido como "open-loop optimal-feedback control" (Camacho y Bordons 1999, Maciejowski 1999, Mosca 1995).

## **4. APLICACIÓN EN LA RED DE AGUA POTABLE DE SANTIAGO DE CHILE**

La red de agua potable de Santiago de Chile es de gran extensión e incluye:

- una zona de captación, que contiene el embalse de El Yeso y la Laguna Negra, situados en la pre-cordillera andina y parte del río Maipo con sus afluentes
- una zona de producción con cuatro plantas potabilizadoras
- una zona transporte, formada por tres acueductos (en lámina libre) que llevan el agua potable hasta las zonas de consumo, donde existen depósitos de almacenamiento y elementos de regulación de presión, como bombeos y válvulas. Las zonas de consumo disponen, además, de algunas fuentes subterráneas de suministro de agua, que se utilizan cuando la producción de las potabilizadoras y el almacenamiento son insuficientes para abastecer la demanda
- un sistema de telecontrol y telemetría de esta red

La complejidad de esta red hace que no sea fácil calcular las mejores estrategias futuras de control de manera intuitiva. Los objetivos fundamentales de la explotación son:

- abastecer las demandas con los niveles de presión requeridos
- mantener un nivel importante de almacenamiento en todo momento (seguridad frente a emergencias)
- hacer una gestión de las potabilizadoras y válvulas telecontroladas que no tenga variaciones bruscas
- utilizar al mínimo las captaciones subterráneas, para proteger el nivel freático
- minimizar los costes de adquisición y bombeo del agua

Conjuntamente con las empresas Clabsa, Aguas Andinas y EMUASA se ha llevado a cabo el modelado y la optimización de la gestión de esta red de agua potable de gran escala. En el proyecto, se ha desarrollado una herramienta de uso general, PLIO®, útil para redes de ésta y otras ciudades.

Utilizando técnicas de modelado y control predictivo, incorporadas en la herramienta PLIO, ha sido posible disponer de un sistema de control predictivo para la red de Santiago de Chile que, a cada hora, calcula:

- predicciones a 24h de demanda en 93 puntos de consumo
- estrategias óptimas (24h) de control para 103 válvulas, 56 compuertas, 118 bombeos y 6 potabilizadoras
- evolución de volúmenes en 127 depósitos en las próximas 24 h. con estas estrategias

La Fig. 1 presenta un esquema de la red. En la Fig. 3 se ve una pantalla del programa PLIO en ejecución.

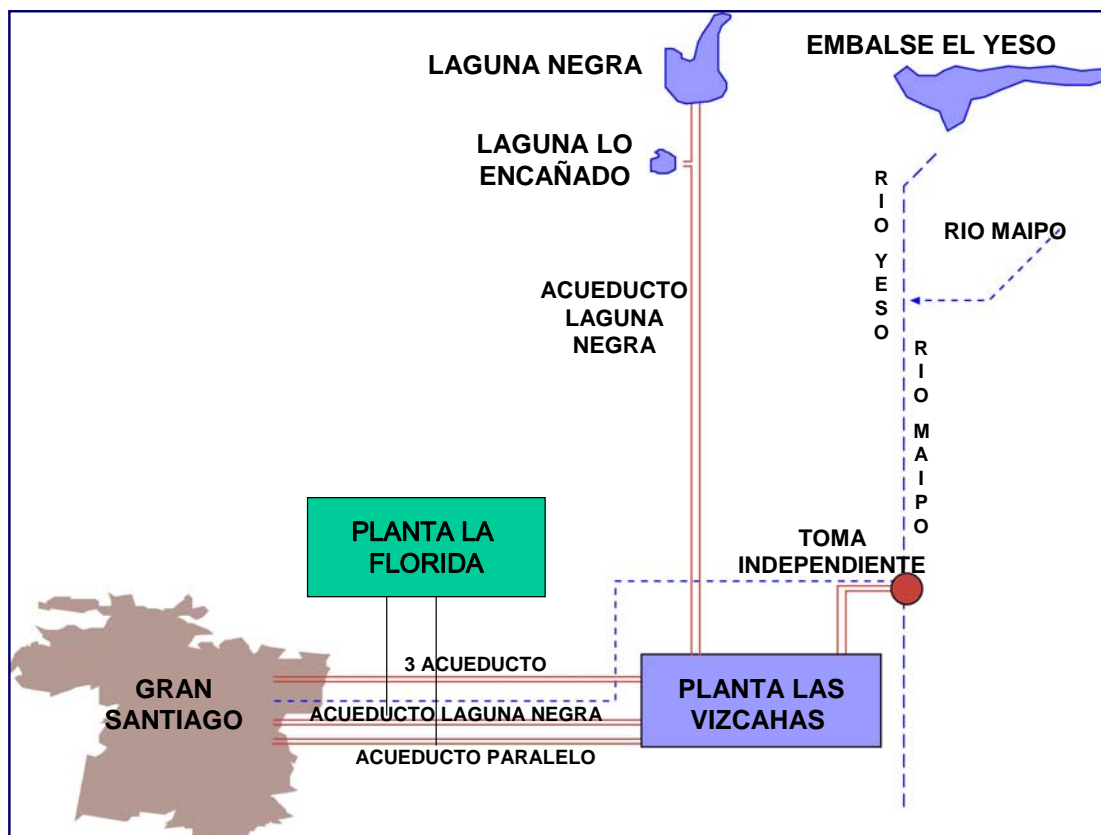


Fig. 1. Esquema de la red de agua potable

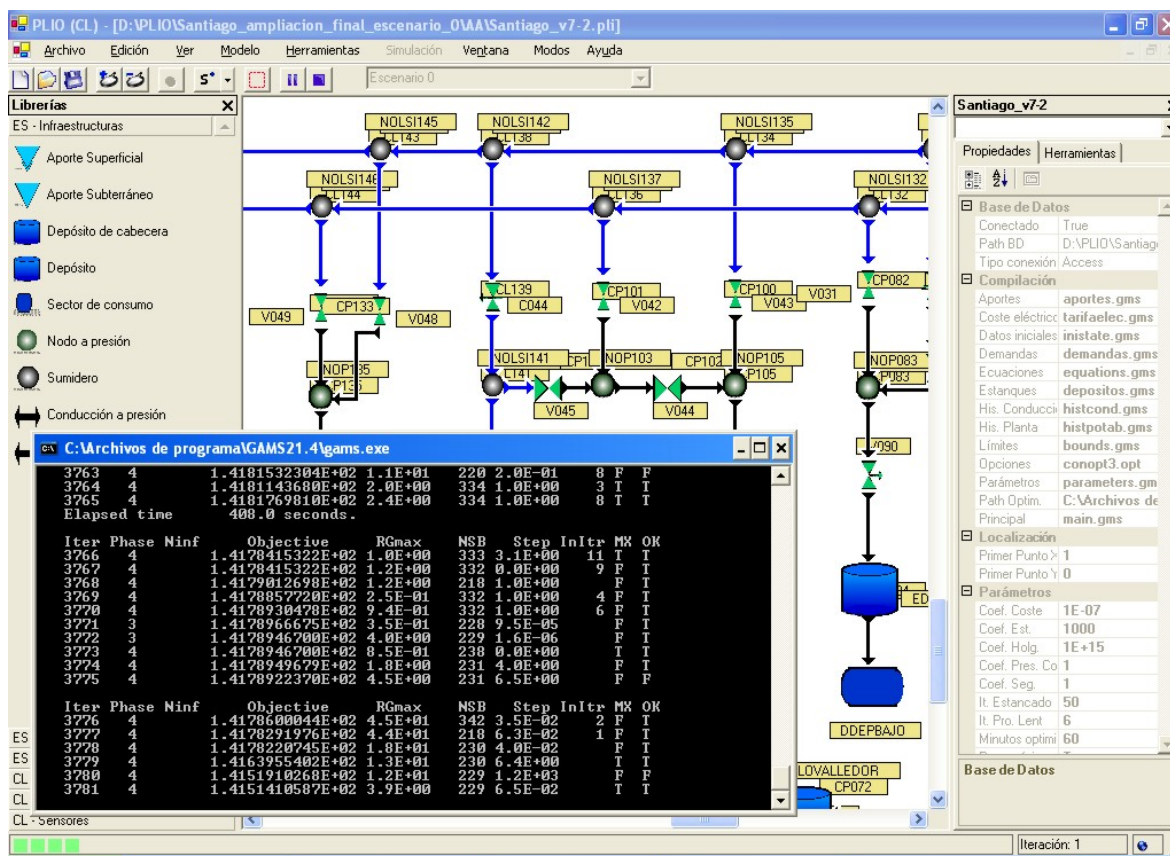


Fig.2 Pantalla del PLIO

Este sistema ha sido validado con éxito en escenarios basados en situaciones reales, tales como: una bajada de demanda producida por una lluvia en verano, una rotura en uno de los tres acueductos y una bajada de producción de las potabilizadoras, debida a un aumento de turbidez en el río Maipo.

Este mismo sistema se aplicó con la colaboración de la misma CLABSA i de EMUASA a una una red de tamaño medio, pero más alta complejidad, la de la ciudad de Murcia. Para ello se ha usado la misma herramienta PLIO introduciéndole nuevas funcionalidades:

- análisis de perdidas de carga
- conducciones bidireccionales
- análisis de la calidad
- obtención de consignas optimas basadas en estos análisis y los ya implementados en la versión previa

Los nuevos escenarios basados también en situaciones reales han servido para validar éstas y las funcionalidades ya existentes. Con lo cual se ha mejorado la generalidad de la herramienta.

## 5. APLICACIÓN EN LA RED DE ALCANTARILLADO DE BARCELONA

El alcantarillado de Barcelona es unitario, es decir, que recoge tanto las aguas residuales como las pluviales. La red de alcantarillado canaliza esta agua hacia una estación depuradora, desde donde se vierten las aguas depuradas al Mediterráneo. El crecimiento de la ciudad, el aumento de las zonas impermeables de suelo y la climatología de Barcelona, donde son frecuentes las tormentas intensas, hacen que el sistema de alcantarillado tradicional sea insuficiente en casos



de fuertes tormentas, lo que produce inundaciones y vertidos contaminantes al mar. Por esta razón, se ha construido en los últimos años una importantísima ampliación de la infraestructura hidráulica, con 7 depósitos subterráneos de retención de aguas pluviales, 36 compuertas de desviación de caudales y un depósito de retención anti-vertidos, justo antes de la planta depuradora. Asimismo, se ha instalado una red de telemetría con 23 pluviómetros y 136 limnímetros (medidores de nivel de agua en los colectores).

La gestión de las compuertas de entrada y salida de los depósitos, así como de las de desviación de caudal, debe hacerse en tiempo real, con los objetivos siguientes:

- minimizar inundaciones
- canalizar toda el agua hacia la depuradora para minimizar vertidos al mar por rebosaderos de emergencia
- mantener la red lo más vacía posible

El tercer objetivo se refiere al llenado y vaciado de los depósitos de retención durante los episodios de lluvia. El vaciado debe ser lo más rápido que permitan los colectores aguas abajo, según las condiciones meteorológicas, para mantener la seguridad de capacidad de almacenamiento, en previsión de nuevas lluvias.

En el proyecto “Telecontrol Optimizado de Redes de Alcantarillado”, desarrollado conjuntamente con las empresas Clabsa y Emuasa, se llevó a cabo el modelado de las redes e alcantarillado de Barcelona y Murcia y el planteamiento y la resolución de problemas de control óptimo de los elementos de control de caudal, para evitar inundaciones y vertidos contaminantes al mar. Su funcionamiento se demostró en una cuenca piloto de Barcelona. Actualmente, se trabaja en su implementación en línea en el centro de control de Clabsa. Asimismo, en el marco de este proyecto se desarrolló la herramienta de uso general CORAL<sup>®</sup>, útil para redes de alcantarillado de otras ciudades. La Fig. 3 representa la situación de la cuenca piloto en el plano de Barcelona y el modelo empleado.

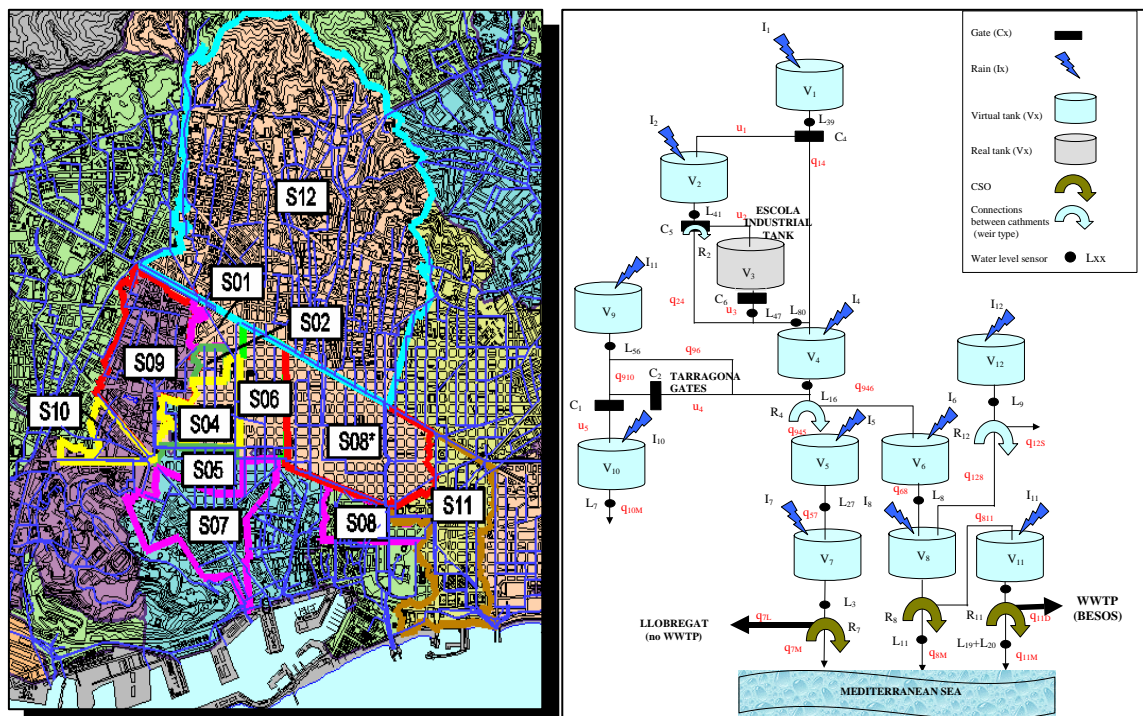


Fig. 3 Cuenca Piloto de Barcelona

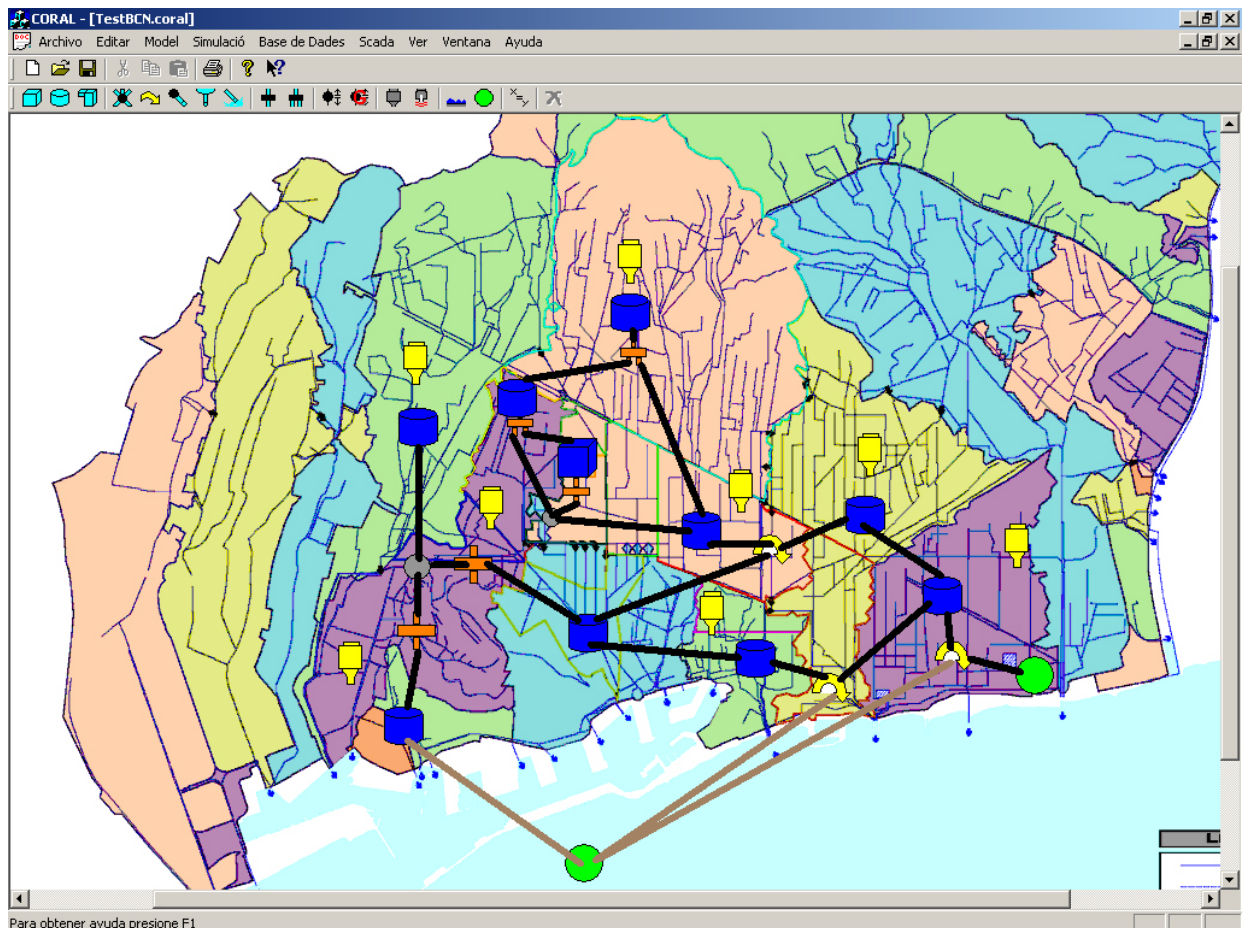


Fig.4 : Una pantalla del programa CORAL

El uso de CORAL en situaciones de lluvias intensas permite minimizar el riesgo de inundaciones en la ciudad y el de vertido de aguas no depuradas al mar. En la Fig.4 se ve una pantalla del programa CORAL trabajando sobre el modelo de la cuenca piloto de Barcelona.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la contribución de las técnicas de modelado y de cálculo predictivo de consignas para la gestión de los sistemas del ciclo del agua. El uso de estas técnicas para controlar en tiempo real los elementos de control, tales como válvulas o bombeos, desde un sistema de telecontrol, contribuye en gran medida a la consecución de objetivos de sostenibilidad en el uso de los recursos, así como prevención de inundaciones y contaminación del medio natural.

## 7. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, los autores quieren agradecer profundamente el apoyo técnico, humano y económico recibido por las empresas CLABSA, Aguas Andinas y AGBAR para llevar a cabo nuestra contribución en estos interesantes proyectos de modelado y control para la gestión del agua. El proyecto "Telecontrol Optimizado de Redes de Alcantarillado" ha sido parcialmente financiado por la CICYT (COO1999-AX072). Los autores pertenecen al grupo de investigación SAC (Sistemas Avanzados de Control) de la Universitat Politècnica de Catalunya, parcialmente

financiado por las ayudas de la Comisión de Investigación de la Generalitat of Catalunya (ref. 2001SGR00236) y de la Comisión de Ciencia y Tecnología del Ministerio de Educación y Ciencia CICYT (ref. DPI2002-02147).

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Boukhris, A., Giuliani, S., Mourot, G. (1997). "Rainfall-runoff modeling for sensor diagnosis". In Proc. IFAC SAFEPROCESS'97, Hull, England.
- Boukhris, A., Giuliani, S., Mourot, G. (2001), "Rainfall-runoff multi-modelling for sensor fault diagnosis", *Control Engineering Practice*, vol 9 (6), pp. 659-671.
- Brdys, M. A., Ulanicki, B. (1994) "Operational control of water systems: Structures, algorithms and applications", Prentice Hall International, UK
- Camacho, E.F. and C. Bordons (1999). "Model Predictive Control" in *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*. Springer. London.
- Cembrano, G., Quevedo, J. (1999), "Optimization in Water Networks" en *Computing and Control for the Water Industry* (R. Powell, K. S. Hindi eds.) Research studies Press, UK
- Cembrano, G., Wells G., Quevedo J., Pérez R., Argelaguet R. (2000). "Optimal Control of a Water Distribution Network in a Supervisory Control System". *Control Engineering Practice* vol.8/10, pp.1177-1189. Elsevier. Great Britan.
- Cembrano, G., Quevedo J., Salamero, M., Puig, V., Figueras, J. and J. Martí (2004). "Optimal Control of Urban Drainage Systems. A Case Study". *Control Engineering Practice* vol.12(1), pp.1-9. Elsevier. Great Britan.
- Chow, V. (1988). *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill, New York.
- Ferrante, M., Brunone, B. "Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. Part 1. Harmonic analysis". *Advances in Water Resources*, Volume 26, Issue 1, January 2003, Pages 95-105.
- Ferrante, M., Brunone, B. Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. Part 2. Wavelet analysis. *Advances in Water Resources*, Volume 26, Issue 1, January 2003, Pages 107-116
- Maksimovic C., Butler D., Memon A. A., K (2003). "Advances in Water Supply Management". Swets & Zeitlinger, The Netherlands
- Meirlaen, J. (2002), "Immission based real-time control of the integrated urban wastewater system", PhD Gent University.
- Pleau M, Methot F, Lebrun A and Colas H., (1996) Minimizing Combined Sewer Overflows in Real-Time Control Applications in *Water Qual. Res. Journal*, vol 31, pp775-786, 1996.
- Price, R. K (2000). "Hydroinformatics and Urban Drainage: An Agenda for the 21<sup>st</sup> Century" *Journal of Hydroinformatics* Vol.2 No.2 IWA Publishing.
- Puig V., Quevedo J., Figueras J., Riera S., Cembrano G., Salamero M., Wilhelmi G. (2003). Fault detection and isolation of rain gauges and limnimeters of Barcelona's Sewer system using interval models IFAC SAFEPROCESS, 2003 Washington, USA.